

# 诸广山岩体中部物化探铀矿深部找矿方法的应用研究

罗 晨, 肖振华, 蔡勋龙

湖南省核工业地质局三〇二大队, 湖南 郴州  
Email: 516279091@qq.com

收稿日期: 2021年4月22日; 录用日期: 2021年5月17日; 发布日期: 2021年5月24日

## 摘 要

通过在诸广山岩体中部实施地面伽玛总量剖面测量、地面伽玛能谱剖面测量、 $^{210}\text{Po}$ 剖面测量、氡气剖面测量、可控源音频大地电磁法、高精度磁测等多种找矿方法试验, 探索区内最佳有效的铀矿找矿方法, 结合各种方法的成果及验证结果, 认为“ $^{210}\text{Po}$ 剖面测量 + 氡气剖面测量 + 地面伽玛总量剖面测量 + CSAMT/AMT法”是本区最合理有效的铀矿找矿方法组合, 该方法组合对南方花岗岩型铀矿找矿具有指导意义。

## 关键词

诸广山岩体中部, 铀矿, 物化探找矿方法, 应用研究

# Applied Research on Deep Prospecting Method for Geophysical and Geochemical Prospecting Uranium Deposit in the Middle Part of Zhuguangshan Rock Mass

Chen Luo, Zhenhua Xiao, Xunlong Cai

No. 302 Brigade, Hunan Nuclear Industry Geology Bureau, Chenzhou Hunan  
Email: 516279091@qq.com

Received: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2021; accepted: May 17<sup>th</sup>, 2021; published: May 24<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In the middle part of Zhuguangshan rock mass, a series of prospecting methods were carried out, such as ground gamma total quantity profile measurement, ground  $\gamma$ -ray spectrometric profile measurement,  $^{210}\text{Po}$  profile measurement, radon gas profile measurement, controlled source audio magnetotelluric and high-accurate magnetic survey, to explore the best and effective method of uranium ore prospecting in the area. Combined with the results of various methods and verification results, it is considered that “ $^{210}\text{Po}$  profile measurement + radon gas profile measurement + ground gamma total quantity profile measurement + CSAMT/AMT method” is the most reasonable and effective combination of uranium prospecting methods in this area. The combination of these methods is of guiding significance to the prospecting of granite-type uranium deposits in south China.

## Keywords

Middle Part of Zhuguangshan Rock Mass, Uranium Deposit, Geophysical and Geochemical Prospecting Method, Applied Research

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

湖南省诸广山中部的鹿井矿田为我国著名的铀矿田，其大多数铀矿床都是上个世纪六十年代初至八十年代末勘查发现的，综合鹿井矿田已知矿床以往物化探找矿方法看，主要就是分三步进行：一是根据航空伽玛异常圈定远景区，二是开展路线伽玛测量，三是开展放射性水化学找矿。大量事实证明：此三种方法在寻找地表有矿化信息铀矿方面是行之有效的，鹿井矿田大部分矿床都是地质调查结合这些物化探方法所发现的[1] [2] [3]。

通过前人近 50 年的辛劳工作，地表及浅表的找矿工作程度已经很高，现阶段及今后地质找矿突破主要要着眼于深部找矿，即老矿山、老矿床的边深部找矿[4] [5] [6]。深部找矿除了地表矿化信息及已知矿体信息外，必需用有效的方法手段确定矿体靶向、靶区，为钻探验证提供依据和保障。随着找矿难度的进一步加大，常规的放射性测量找矿方法已不能满足目前铀矿勘查的需要，因此，在放射性物探找铀矿方法的基础上，探索普通物探及化探方法探测深部铀成矿环境是很有必要的。

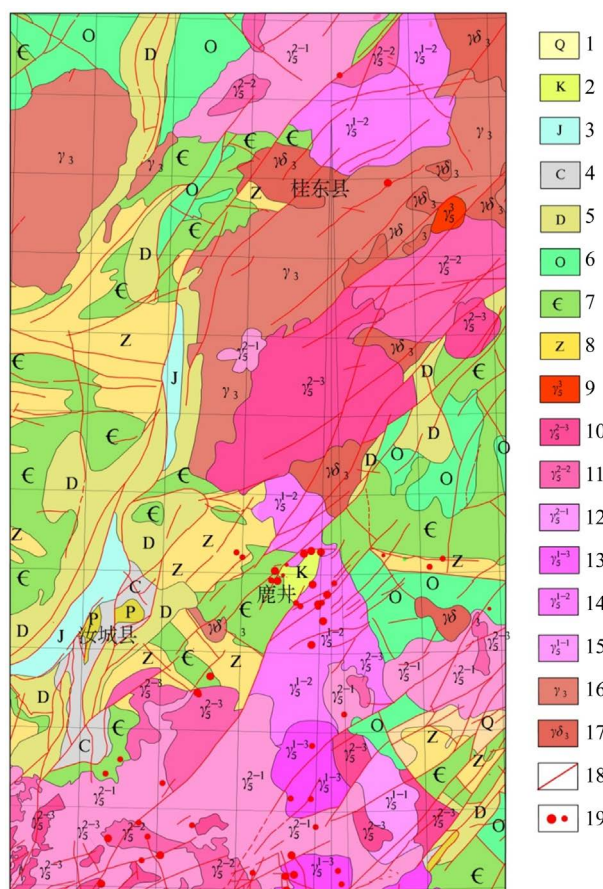
目前国际上有两种针对深部铀矿体的找矿勘查技术：第一是通过高分辨率反射地震技术，向深部追踪地表已经发现的控矿构造，从而发现深部矿体；第二种是通过综合探测、立体填图，预测并寻找深部矿床，这其中最成功的例子是西澳大利亚 Menzies-Norseman 成矿带进行的三维立体探测。在我国寻找到的富铀矿体规模往往较小，勘探深度多在 300~450 m 之间，其铀金属储量与铀矿体的勘探深度与国外一些著名的热液型铀矿床有很大差距，在 500 至 2000 m 之间仍有巨大的找矿空间。单一勘查技术难以满足深部找矿的要求，需要地球物理和地球化学探测技术、资源勘查新技术的不断更新。如何实现深部找矿新突破，提高攻深找盲的能力，是目前我们面临探索和研究的新课题。

因此，要确立适合于各自找矿地区成矿模式的找矿模式，明确探寻深部不同地质构造环境的方法最佳组合。而 “ $^{210}\text{Po}$  测量 + 氡气测量 + 地面  $\gamma$  总量测量 + CSAMT/AMT 法” 是本区经验证的有效深部

找矿方法手段。

## 2. 区域地质概况

研究区位于华南成矿省南岭成矿带中段中生代锡银铅锌稀有稀土铀成矿区万洋-诸广山铀成矿带，扬子地台与南海-华夏地台之间的南华活动带中的闽赣后加里东褶皱带西缘，万洋-诸广山复式岩体由南北向转为东西向的内凹部位的内外接触带。受九峰-大余东西向隆起带、万洋-诸广山南北向隆起带和万长山北东向隆起带的三重控制[7] [8]。研究区出露地层为新元古界岭秀组、震旦系、古生界寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系、中生界侏罗系、白垩系及新生界第四系(见图 1) [9]；诸广山岩体外围主要出露地层为震旦-寒武纪地层。区内岩浆活动频繁，从加里东期至燕山晚期均有岩浆侵位，且岩性复杂，既有酸性岩类、中酸性岩类，又有中性、基性岩类。根据岩体与围岩接触关系、岩体之间接触关系及同位素年龄资料，诸广山岩体中北段岩浆活动期次可分为加里东期、印支期、燕山早期及燕山晚期。本区受加里东、印支、燕山、喜马拉雅运动影响，褶皱、断裂发育，铀矿化主要受断裂控制；区域深大断裂控制矿田的产出，主干断裂控制矿床的产出，次级构造控制矿体的产出[10] [11] [12] [13]。



1-第四系；2-白垩系；3-侏罗系；4-石炭系；5-泥盆系；6-奥陶系；7-寒武系；8-震旦系；9-燕山晚期花岗岩；10-燕山早期第三阶段花岗岩；11-燕山早期第二阶段花岗岩；12-燕山早期第一阶段花岗岩；13-印支期第三阶段花岗岩；14-印支期第二阶段花岗岩；15-印支期第一阶段花岗岩；16-加里东期花岗岩；17-加里东期花岗闪长岩；18-断裂构造；19-铀矿床、矿点

**Figure 1.** Geological sketch map of complete exploration area of uranium-polymetallic deposit in the middle of Zhuguang rock mass

**图 1.** 诸广岩体中部铀多金属矿整装勘查区地质简图

### 3. 区域地球物理场特征

#### 3.1. 区域重力场特征

研究区内区域布格重力异常值均较低,布格重力异常幅值为 $-64\sim-94 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。研究区受宁冈-桂东南北向负异常带和九峰-长江东西向负异常带联合控制,表现为北部南北向负异常带与南部东西(北东东)向负异常带交汇。其中岩体北段为大范围的重力低值区,呈南北向展布,主要是诸广山北部花岗岩体的反映,布格重力异常幅值为 $(-86\sim-94) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。三江口-热水地区同样为布格重力异常相对低值区,呈北东东向展布,主要是诸广山南部花岗岩体的反映,布格重力异常幅值为 $(-76\sim-80) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。西部汝城县地区和东南角布格重力异常值相对较高,主要是岩体外带地层的反映。研究区内花岗岩广泛出露,根据岩石物性测定资料可知,花岗岩的密度(平均约为 $2.56 \text{ g/cm}^3$ )低于广泛分布的上古生界地层(平均约为 $2.66 \text{ g/cm}^3$ ),因此,花岗岩体往往显示为重力低异常圈闭[14]。

#### 3.2. 区域航磁特征

据1:5万航磁资料,鹿井地区-横水垅-五里凹-线航磁 $\Delta T$ 零等值线呈北东向展布,其西北部岩体为负值区,东南部为正值区,区内主要矿床(点)分布在突变带附近,并与航空伽玛能谱异常带的展布方向吻合。航磁特征还表明,黄坳、遂川、热水断裂均为切割地壳或基底的深断裂,上地幔热流可沿断裂带上涌浅表,表现出地热与磁场的相关性。

#### 3.3. 区域伽玛特征

##### 3.3.1. 航空伽玛能谱特征

区域航空伽玛能谱资料表明,诸广山岩体的铀、钍、钾含量高、变化大的特征,三者的高场区、低场区吻合较好,高场区受花岗岩体形态所控制。航空放射性铀、钍含量总体特征显示岩体铀、钍含量显著高于外围地层。岩体航放铀含量变化较大,一般在 $(3.5\sim 10) \times 10^{-6}$ 之间,大于 $4.5 \times 10^{-6}$ 的铀含量高值区分布不均匀。岩体铀含量变化总体上呈南部高于北部的变化势性趋,北部铀含量高值区面积小而分散。岩体南段和北段航放钍含量差异不大,一般在 $(14\sim 30) \times 10^{-6}$ 之间,且高值区更加分散。铀异常主要由燕山-印支期花岗岩体中铀局部富集引起的。异常区内及其附近已发现较多铀矿床和铀矿点,说明这些航放铀异常显示地带是区内花岗岩型铀矿找矿的有利地区。

##### 3.3.2. 地面伽玛特征

地面伽玛测量成果反映了研究区放射性元素(U、Th、K)总的分布规律。地面伽玛异常等值线图显示,花岗岩区放射性总体要强于沉积岩区。地面伽玛异常多呈带状分布、受断裂构造控制的特点。伽玛异常带从五里凹地区延伸至清洞地区,呈北东走向,与该区主要断裂方向一致。研究区中部丰州地区伽玛异常点带众多,围绕丰州盆地呈环状分布,这与鹿井矿田产出的各矿床相一致。岩体内异常带主要呈北东向分布,岩体外带中的异常带多呈北西向分布,反映了岩体内、外带铀矿受不同方向断裂控制。研究区南部的伽玛异常带主要分布在秀才洞-九龙径地区和九龙江-三江口地区,伽玛异常场受岩性和断裂构造带共同控制。断裂构造带比较发育的地段,不但伽玛异常场强度比较高,而且面积也较大。伽玛异常场以条带状或串珠状为主,椭圆状、不规则状和团块状次之;异常场长轴方向多呈北东向、北东东向等,主要沿断裂构造带分布[15]。

### 4. 物探方法应用特点

放射性物探方法属于直接找铀矿的物探方法,它可以大致反映铀矿的异常存在及大小,速度快,成



本低。通过寻找放射性异常点、带，研究伽玛场特征及其与铀矿化的关系，从而评价区内铀矿资源和寻找具有经济价值的铀矿床。普通物探方法属于间接找矿方法，用于查明铀成矿的地质环境，查明岩层界线，寻找深部隐伏构造及其延伸、规模、形态、产状等。影响岩石电阻率和磁化率的因素较多，为了减少物探异常的多解性，一般开展普通物探方法在物探成果解译时要结合具体的地质情况进行综合分析。

#### 4.1. 地面伽玛总量测量

地面伽玛总量测量是利用便携式辐射仪测量岩石和矿石和疏松沉积物中的伽玛照射量率，寻找放射性异常或放射性增高地段，借以发现放射性铀矿床。方法简单灵活、速度快、效率高，在基岩出露良好和覆盖层不厚的地区，地面伽玛测量尤为有利，它是铀矿普查找矿中最常用的方法之一，在铀矿勘查领域具有重要的地位，主要是圈定异常范围，缩小找矿靶区，在盲区找矿具有指导意义。由于  $\gamma$  射线在固体介质中的穿透能力较弱，在岩石中的穿透能力不到 1 m，故地面伽玛测量的探测深度较浅和探测范围较小。

#### 4.2. 地面伽玛能谱测量

地面伽玛能谱测量是通过使用便携式  $\gamma$  能谱仪，在天然产状条件下，测量不同能量的  $\gamma$  射线照射量率，直接测定岩石、矿石或土壤中铀、钍、钾含量和总道计数率的一种放射性物探方法，这种找矿方法除了可以直接寻找铀、钍矿床外，也可用于寻找与放射性元素共生的金属与非金属矿床。这一方法目前在铀矿化与钍矿化混合地区进行普查时应用较广泛，是放射性矿产勘查中较实用的方法之一，能直接寻找铀、钍、钾矿床或铀钍混合性矿床，且能及时对异常作出评价。此方法的缺点与地面伽玛总量测量一样，其探测深度相对较浅。

#### 4.3. 氡及其子体测量

氡及其子体测量是一种直接寻找隐伏铀矿的放射性勘查方法，它分为瞬时测量和累计测量。瞬时测量包括氡的常规方法测量(简称常规法测氡)和氡的  $^{210}\text{Po}$  测量(简称 RaA 法测氡)。累积测量有 a 径迹蚀刻法测氡(简称径迹法测氡)、活性炭吸附法测氡(简称活性炭法测氡)和其它方法。氡射气和钍射气是由天然放射性元素铀和钍衰变产生的，因此，当地质体含有铀或钍时，就会不断地产生氡、钍射气，并向周围扩散，形成以地质体为中心的射气分散晕。射气测量是使用射气测量仪直接测量土壤、水及大气中氡钍射气的浓度，并通过研究射气浓度的分布特征来解决某些地质问题的一种放射性测量方法，用来寻找浮土覆盖下的铀矿体，也是寻找构造的有效方法之一[16]。该方法适用于地形较复杂，松散覆盖层分布广泛的地区，且具有测量深度大、方法简便、技术成熟、适用经济等特点，是攻深找盲的主要方法之一。

#### 4.4. $^{210}\text{Po}$ 法测量

$^{210}\text{Po}$  是铀系中  $\alpha$  衰变的最后一个放射性子体，它可以分布于铀矿体周围形成分散晕[17]。此方法是通过在野外采取土样，测量土壤样品中  $^{210}\text{Po}$  的含量来发现铀异常，从而寻找深部铀矿的一种方法，是直接获取铀矿信息的方法之一，在攻深找盲中发挥着重要作用。具有找矿灵敏度高、野外工作效率高、适应性强、探测深度大、野外操作简单等特点，是攻深找盲的主要方法之一。

#### 4.5. 地面高精度磁测

地面高精度磁测是利用岩石磁化率差异来解决岩体的分布、隐伏断裂的发育情况等地质问题。由于测量精度较高，能发现较微弱的磁异常变化，一般岩石蚀变区、断裂带、岩石接触带等地的磁化率与周边地质体的差异较大，鉴于此，地面高精度磁测在花岗岩地区主要用来查明不同期次岩体接触带及与铀

成矿有密切关系的断裂构造、脉体等,为地质找矿提供依据,并预测找矿远景区。由于铀矿物的磁性与一般造岩矿物差别不大,因此利用磁法不能直接找到铀矿。

#### 4.6. 天然场音频大地电磁测深

天然场音频大地电磁测深法(AMT)是以岩石导电性差异为基础的电磁勘探,采用天然场源进行电磁测深的一种勘探方法。基于电磁感应原理,在地面测量相互正交的音频范围(0.1 Hz~50 kHz)电场和磁场分量,计算视电阻率和阻抗相位(简称相位),研究地下电阻率结构的一种被动源的频率域测深方法,英文简称 AMT [18] [19]。音频大地电磁测深工作采用 EH4 系统测量,工作频率范围在 10 Hz~100 KHz,采用最新数字处理器的连续电导率成像系统,该系统是采用天然场源与人工场源相结合大地电磁测量系统,其有效勘探深度为几十米至三千米左右,其观测的基本参数为正交的电场分量和磁场分量,通过密点连续测量,采用专业反演解释处理软件可以组成地下二维电阻率剖面,甚至三维立体电阻率成像。通过测量每个频点上的电场  $E$  和磁场  $H$ ,由此计算出视电阻率和相位变化规律,据此确定该点上一定体积范围内地下介质结构情况[20]。该方法具有分辨率高、勘探深度大、地形影响小、工作效率高的特点。在铀矿勘查中主要探测中深部地质信息,基本确定区域的主要地质构造分布以及断裂破碎带的空间形态、位置、规模、埋深等,对铀矿控矿主构造两侧次级构造的深部变化情况、次级构造与主构造的关系等地质问题。此方法的应用条件:1) 目标体与围岩存在明显电阻率差异。2) 目标体有足够的尺度能在地表能引起可分辨的异常。3) 信噪比能满足本规程所规定的观测数据质量要求。4) 地形地貌条件适合测站布设。

#### 4.7. 可控源音频大地电磁测深

可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)是以岩石导电性差异为基础的电磁勘探,采用人工场源进行电磁测深的一种勘探方法,其频率范围为 0.25 Hz~8192 Hz,利用改变频率达到测深的目的[21] [22]。该方法具有分辨率高、勘探深度大、地形影响小、工作效率高的特点。在铀矿勘查中主要探测中、深部地质信息,解疑主要地质构造分布以及断裂破碎带的空间形态、位置、规模、埋深等,解疑控矿主构造次级构造的深部变化情况、次级构造与主构造的关系等地质问题。采用人工场源可以克服天然场源信号微弱的缺点,但是波的非平面波特性和复杂性决定了处理资料时的复杂性,当发射距是探测深度的 3~5 倍,高频时非平面波可以近似地看作平面波,低频时则会出现电阻率随频率降低而在双对数坐标图上呈 45°上升的近场效应,因此须作近场改正及场源效应、静态效应等的消除和校正[23] [24]。此方法的应用条件:1) 目标体与围岩存在明显的电阻率差异。2) 目标体有足够的规模,观测的异常信号可以从干扰场或背景场中分离出来。3) 无强烈的电磁干扰。4) 地形地貌条件适合开展工作。

### 5. 综合物化探应用实例

#### 5.1. 综合物化探在羊角脑地区的应用

该区位于鹿井矿田主干断裂  $QF_V$  号带,本次工作主要是查明  $QF_V$  号断裂构造带及其次级构造的分布特征及延深情况。开展了地面  $\gamma$  总量测量、可控源音频大地电磁测深、高精度磁法剖面测量、氡气剖面测量、 $^{210}\text{Po}$  剖面测量、地面  $\gamma$  能谱剖面测量等 6 种物化探勘查方法(见图 2)。

高精度磁法剖面测量成果显示,整体异常不明显。

$^{210}\text{Po}$  法剖面测量成果显示,异常明显,异常数值为(0.019~0.541) Bq/g,异常分布范围在点 110 m~130 m、320 m~400 m、440 m~460 m 处,异常峰值位于点 110 m 处(0.541 Bq/g)。

$\gamma$  总量剖面测量成果显示,整体异常数值不高,异常数值为(1.72~10.30) nC/(kg·h),异常分布范围在点 330 m~350 m 处,峰值位于点 340 m 处,其余异常不明显。从测量结果来看,异常具有一定规模,但

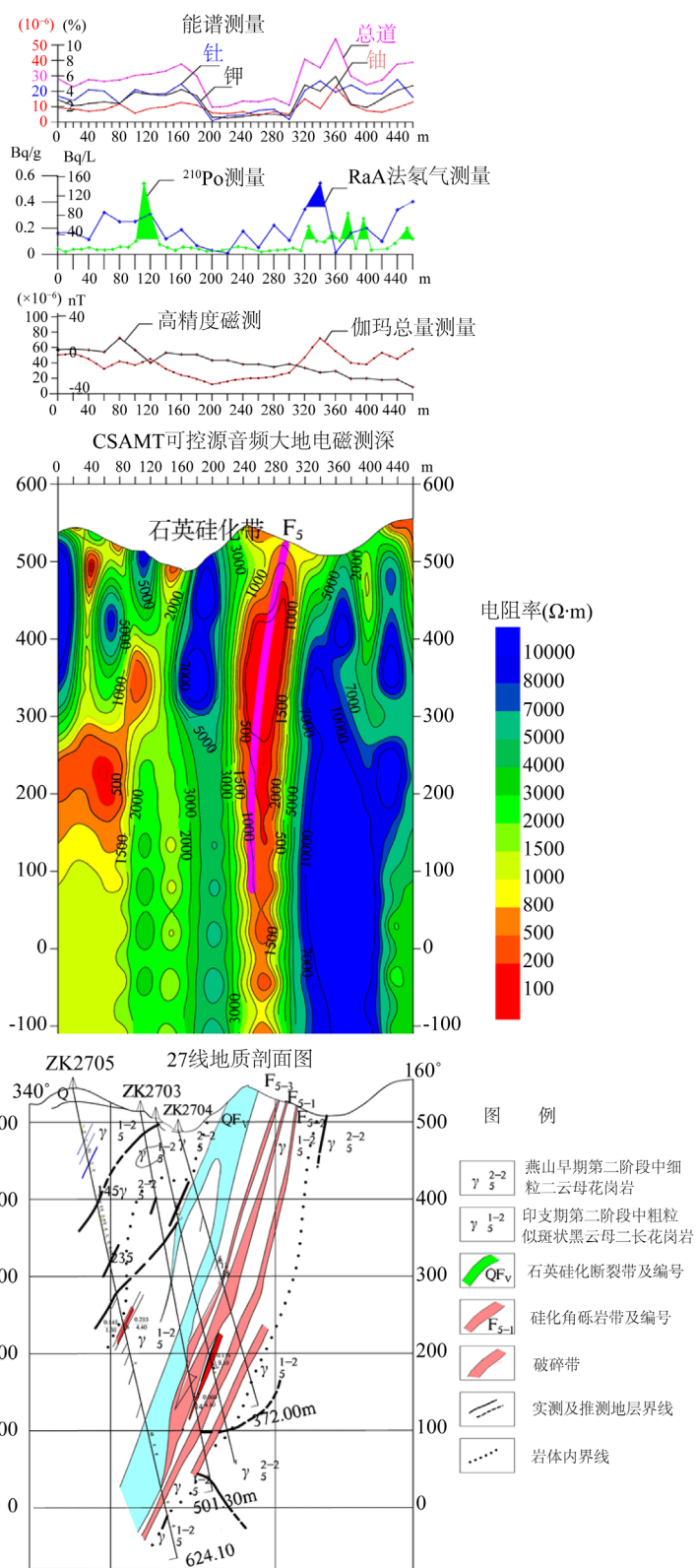


Figure 2. Results of comprehensive geophysical and geochemical survey in Yangjiaonao area

图 2. 羊角脑地区综合物化探测量成果图

异常值不高,说明铀矿化埋藏较深。

氡气剖面测量成果显示,曲线形态与  $\gamma$  总量剖面测量结果相似,整体异常数值不高,异常数值为(1.44~146.89) Bq/L,异常分布范围在点 320 m~350 m 处,峰值位于点 340 m 处,其余异常不明显。

CSAMT 测深剖面测量成果显示,整体电阻率值较高,约为 5000  $\Omega\text{m}$ ,曲线界限明显,在点 180 m 处存在一明显高阻体,电阻约为 8000  $\Omega\text{m}$ ,该高阻体宽约 40 m,倾向北西,倾角约 80°,延伸深度约为 250 m,推测该异常为石英硅化带引起;在点 300 m 处存在一低阻异常带,电阻约为 500  $\Omega\text{m}$ ,该异常体宽约 60 m,倾向北西,倾角约 78°,延伸深度大于 400 m,推测该异常为 QF<sub>V</sub> 构造断裂带的多条次级构造引起。

$\gamma$  能谱剖面测量成果显示,各参数数值变化较大,其中 eU、eTh、K 在石英硅化带上均表现为明显的低值异常,而 eU/K 比值则呈现高值异常。在 320 m~370 m 间,铀含量有四个测点数据超过其异常下限值( $13.85 \times 10^{-6}$ ),最大峰值达到  $22.7 \times 10^{-6}$ ,两个峰值点分别位于 320 m 和 360 m 处,在该两点处总道值也是峰值点,推测该异常为 QF<sub>V</sub> 构造断裂带的次级构造引起。从测量结果来看,异常具有一定规模,但异常值不高,说明铀矿埋藏较深。

经过综合分析研究,对羊角脑地区 27 线多种物化探异常进行了钻孔验证(见图 3)。钻孔 ZK2703 在深部 383.6 m~387.0 m 处揭露到厚度 3.40 m、品位 0.066% 的铀矿体,且见多段异常;钻孔 ZK2704 在深部 199.30 m~199.80 m 处揭露到厚度 0.50 m、品位 0.050% 的铀矿体,且见多段异常;钻孔 ZK2705 在深部 311.60 m~312.90 m 处揭露到厚度 1.30 m、品位 0.148% 的铀矿体,316.10 m~320.50 m 处揭露到厚度 4.40 m、品位 0.264% 的铀矿体,且见多段异常[25] [26]。从 3 个钻孔揭露的情况来看,工业矿主要产在深部 311.6 m~320.5 m 和 383.6 m~387.0 m,异常范围在深部 50 m~550 m 之间,异常位置与  $^{210}\text{Po}$  法、氡气、 $\gamma$  能谱测量结果高度一致。验证结果充分表明多种物化探在诸广山地区铀矿勘查的有效性和重要性,是目前铀矿勘查攻深找盲的重要手段之一。

## 5.2. 综合物化探在庙背垅地区的应用

该区位于鹿井矿田主干断裂 QF<sub>II</sub> 号带,本次工作主要是查明近南北向 F<sub>2</sub> 号蚀变带及 QF<sub>II</sub> 号带的次级构造 F<sub>8</sub> 号带的分布特征及延深情况。开展了地面  $\gamma$  总量剖面测量、可控源音频大地电磁测深、高精度磁法剖面测量、氡气剖面测量、 $^{210}\text{Po}$  剖面测量及地面伽玛能谱剖面测量等 6 种物化探勘查方法(见图 3)。

高精度磁法剖面测量成果显示,在点 90 m 处有一明显异常,曲线峰值较为尖锐,推测该磁性体埋藏较浅、且产状陡立。

$^{210}\text{Po}$  法剖面测量成果显示,异常数值为(0.018~0.467) Bq/g,异常峰值位于点 120 m 处,其余各点异常不明显。

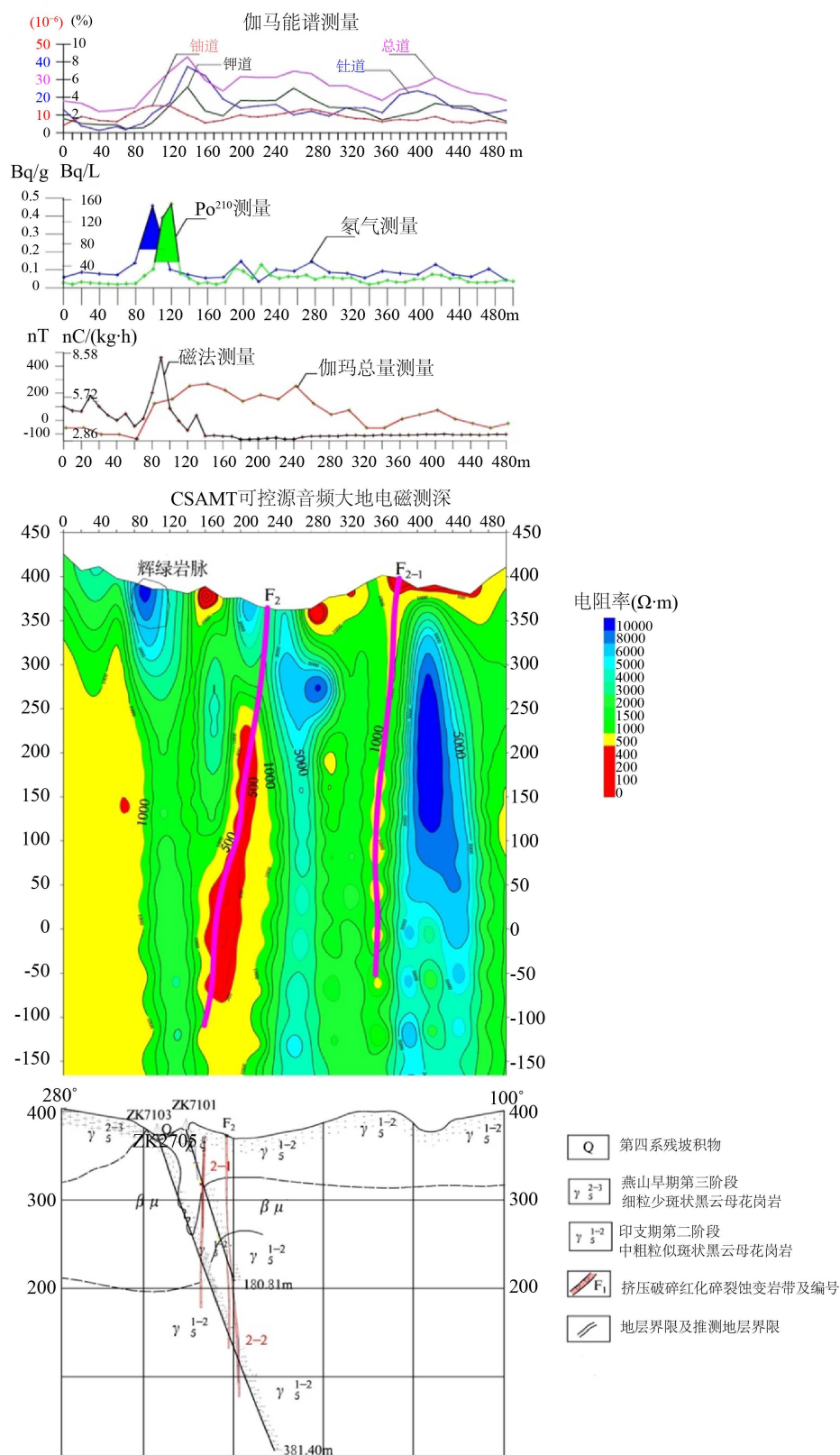
$\gamma$  总量剖面测量成果显示,整体异常数值不高,异常数值为(3.00~6.44) nC/(kg·h),异常峰值位于点 260 m 处,异常不明显。

氡气剖面测量成果显示,整体数值不高,异常数值为(11.19~149.26) Bq/L,异常峰值位于点 100 m 处,其余各点异常不明显。

$\gamma$  能谱剖面测量成果显示,各参数 eU、eTh、K 在剖面上呈现为波浪式变化,没有明显的异常,但在 70 m~90 m 段 eU/K 比值异常呈现峰值,该异常与构造辉绿岩脉有关。

CSAMT 测深剖面测量成果显示,整体电阻率值呈中高阻,约为 3000  $\Omega\text{m}$ ,电性界限明显。在点 100 m 处存在一明显高阻体,电阻约为 8000  $\Omega\text{m}$ ,该高阻体宽约 40 m,产状陡立,延伸深度约为 100 m,推测该异常为辉绿岩脉。在点 230 m 处存在一低阻异常带,电阻约为 500  $\Omega\text{m}$ ,该异常体宽约 20 m,倾向北西,倾角约 78°,延伸深度大于 500 m,推测该异常为 F<sub>2</sub> 号蚀变带引起;同时在点 380 m 处存在一低阻





**Figure 3.** Results of comprehensive geophysical and geochemical survey in Miaobeilong area  
**图 3.** 庙背垅地区综合物化探测量成果图

异常带,电阻约为 600  $\Omega\text{m}$ ,该异常体宽约 10 m,倾向北西,倾角约 82°,延伸深度大于 500 m,推测该异常为  $F_2$  号带次级构造  $F_{2-1}$  号带引起。

经钻孔 ZK71-1 揭露验证,在孔深 62.5 m~64.9 m 见视厚度 2.4 m、品位为 0.053% 的铀矿体,整孔多处见铀异常和矿化[27]。 $^{210}\text{Po}$  剖面测量、高精度磁法剖面测量、氦气剖面测量、伽玛总量剖面测量及伽玛能谱剖面测量均有不同程度的异常反应,这与矿体埋藏较浅有关,可控源音频大地电磁测深解译的推断构造与钻孔揭露的实际构造产状、位置、延伸及规模较吻合。

### 5.3. 综合物化探在沙坝子地区的应用

该区位于鹿井矿田的西外带,本次工作主要是查明寒武纪地层中的北西向层间破碎带  $F_{21}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{23}$  及  $F_{26}$  的深部情况。开展了地面  $\gamma$  总量剖面测量、可控源音频大地电磁测深、高精度磁法剖面测量、氦气剖面测量、 $^{210}\text{Po}$  剖面测量及地面  $\gamma$  能谱剖面测量等 6 种物化探勘查方法(见图 4)。

高精度磁法剖面测量成果显示,整体异常不明显。

$^{210}\text{Po}$  剖面测量成果显示,该剖面整体数值不高,异常数值为(0.010~0.615) Bq/g,异常分布范围在点 150 m~190 m、点 200 m~280 m 处,异常峰值位于点 340 m 处。

$\gamma$  总量剖面测量成果显示,整体异常数值不高,异常数值为(3.43~9.01) nC/(kg·h),异常分布范围在点 160 m~200 m 处,峰值位于点 170 m 处,其余异常不明显。

氦气剖面测量成果显示,整体数值不高,异常数值为(0.361~108.72) Bq/L,异常峰值位于点 240 m 处,其余各点异常不明显。

CSAMT 测深剖面成果显示,整体电阻率值呈中高阻,约为 3000  $\Omega\text{m}$ ,中、高频段电阻率值较小,约为 400  $\Omega\text{m}$ 。在点 110 m、点 170 m、点 360 m、点 620 m 处均存在明显低阻带,且界限明显,延伸深度大于 400 m,推测为断裂带引起。

$\gamma$  能谱剖面测量剖面成果显示,各参数 eU、eTh、K 含量曲线在剖面上呈锯齿状变化,eU 在 150 m~170 m 呈现异常并达到峰值,在 150 m~340 m 区间有明显的铀异常显示,eU/K 比值在 150 m~170 m 也出现峰值异常,说明该异常与构造关系密切。

从以上的分析可以得出: $^{210}\text{Po}$  剖面测量、氦气剖面测量、伽玛总量剖面测量及伽玛能谱剖面测量在构造位置附近均有不同程度的异常反应,这与控矿和容矿构造有关;可控源音频大地电磁测深解译推断的构造与地表出露的构造产状、位置较吻合,也反应了构造在深部的延伸、形态及规模等地质情况[28]。

### 5.4. 综合物化探在贺家洞地区的应用

该区位于金银寨矿床北部,茶永盆地西南缘。处于郴州 - 邵阳基底断裂带与茶陵 - 郴州逆冲断裂带的交汇区,耒阳 - 临武南北向构造带中段东侧,北北东向郴州 - 怀集铀成矿带中段,为金银寨矿床向北的延伸区。区内地表为大面积的盆地砂岩所覆盖,针对红盆砂岩覆盖区,通过音频大地电磁测深,探测红盆与基底界面、基底地质体、基底断裂构造的空间形态、展布特征,预测矿体可能产出部位。开展了地面伽玛总量测量、氦气测量、 $^{210}\text{Po}$  测量等放射性物化探剖面测量方法(见图 5),提取铀矿化信息,圈定靶区。

剖面测量成果显示,红盆砂岩覆盖层较厚,整个剖面上伽玛值变化较小,没有明显异常显示;氦气在部分地段有高场和异常场明显(推测该异常地段为深部隐伏构造带或含铀矿化硅化带); $^{210}\text{Po}$  数值总体变化不大,只有局部点存在峰值异常;AMT 测深剖面显示存在四条隐伏的中高阻特征的地质体,倾向相对较陡。综合该剖面出现的氦气异常与  $^{210}\text{Po}$  异常,推测在 3160 m~3200 m 区间标高 0 m 附近存在中高阻特征的地质体为与铀矿化关系密切的隐伏硅化带[29]。

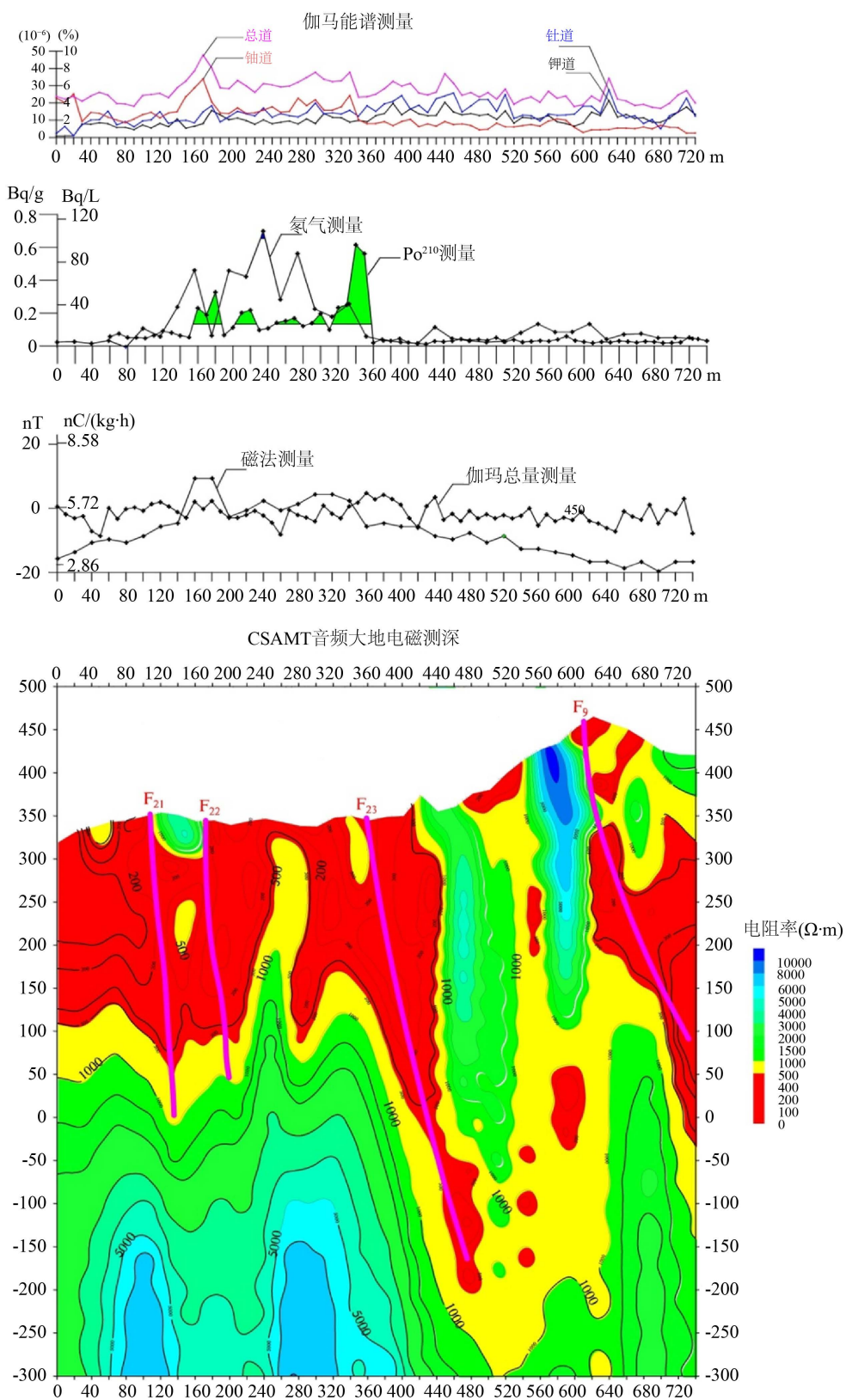


Figure 4. Results of comprehensive geophysical and geochemical survey in Shabazi area  
 图 4. 沙坝子地区综合物化探测量成果图

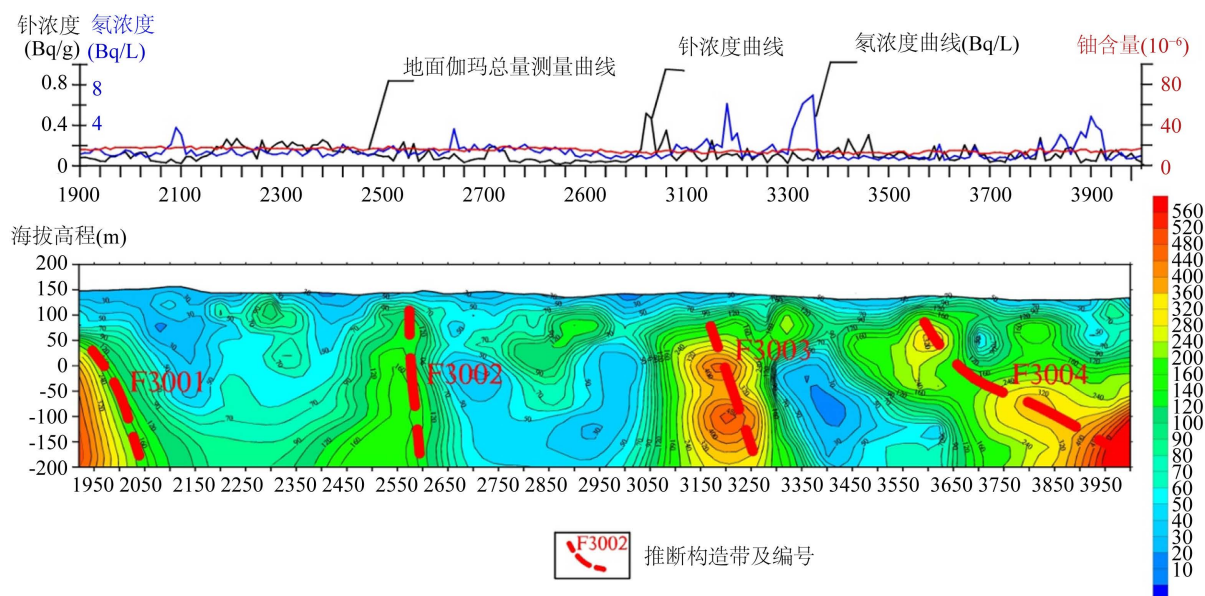


Figure 5. Results of comprehensive geophysical and geochemical survey in Hejiadong area  
图 5. 贺家洞地区综合物化探测量成果图

## 6. 结论

通过采用多种物化探方法对研究区内进行实验研究, 钻孔验证, 多种物化探方法相互补充, 能基本查明区内控矿、含矿构造在深部的分布特征; 能基本查明深部地质体的分布界线; 能基本查明深部铀矿化体的位置、矿化强度等信息。由于地面  $\gamma$  测量的探测深度较浅, 加之随着伽玛普查程度的不断提高, 出露地表尚未被发现的铀矿床越来越少, 因此采取多种方法的综合找矿, 以寻找地下隐伏的盲矿体显得越来越重要。通过综合分析研究, 验证对比, 认为南方花岗岩型铀矿有效的物化探找矿方法组合为“ $^{210}\text{Po}$  测量 + 氡气测量 + 地面  $\gamma$  总量测量 + CSAMT/AMT 法”, 这四种方法相辅相成、优势互补, 能较好地探测花岗岩型铀矿深部的地质问题, 为花岗岩型铀矿深部找矿提供有力的技术手段, 弥补了单一放射性物探找矿方法只能找浅层铀矿的短板, 值得借鉴和探索。

## 致 谢

文中引用的一些数据、成果, 主要来自近年湖南省核工业地质局三〇二大队(东华理工大学、核工业北京地质研究院)承担的有关科研、地质调查及铀矿勘查项目, 主要成果是项目组集体智慧的结晶。在此表示感谢。

## 基金项目

中国地质调查局发展研究中心整装勘查区关键基础地质研究、整装勘查区专项填图与技术应用示范项目(项目编号: 12120114052301)。

## 参考文献

- [1] 张万良, 何晓梅, 吕川, 韦金文. 鹿井铀矿田成矿地质特征及控矿因素[J]. 铀矿地质, 2011, 27(2): 81-87. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-0658.2011.02.004>
- [2] 张金带, 李子颖, 蔡煜琦, 郭庆银, 李友良, 韩长青. 全国铀矿资源潜力评价工作进展与主要成果[J]. 铀矿地质, 2012, 28(6): 321-326. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-0658.2012.06.001>



- [3] 王明太, 罗毅, 孙志富, 朱杰辰, 李建红. 诸广铀成矿区矿床成因探讨[J]. 铀矿地质, 1999, 15(5): 279. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-0658.1999.05.004>
- [4] Xiao, Z.-H., Xiong, S.-B., Li, C.-H., Liu, Y., Yang, Z.-D., Feng, X.-X. and Liu, X.-W. (2020) Types of Uranium Deposits in Central Zhuguang Mountains in Hunan Province, South China and Their Metallogenic Regularity and Prospecting Directions. *China Geology*, 3, 411-424.
- [5] 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 郭庆银, 宋继叶, 范洪海, 刘武生, 漆富成, 张明林. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 1051-1069. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.0001-5717.2015.06.005>
- [6] 刘翔, 陈小东, 邓志强, 黄小强, 包云河, 覃金宁, 肖振华, 汪力群, 应西荣. 湖南省铀矿床类型、成矿系列成矿谱系与找矿新进展[J]. 地质学报, 2020, 94(1): 127-148.
- [7] 柏道远, 黄建中, 李金冬, 王先辉, 马铁球, 张晓阳, 陈必河. 华南中生代构造演化过程的多地质要素约束——湘东南及湘粤赣边区中生代地质研究的启示[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1): 1-13. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1001-1552.2007.01.001>
- [8] 柏道远, 黄建中, 刘耀荣, 伍光英, 马铁球, 王先辉. 湘东南及湘粤赣边区中生代地质构造发展框架的厘定[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 557-570. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-3657.2005.04.004>
- [9] 李春华, 杨中鼎, 肖振华, 魏元泵. 诸广山岩体中北部铀矿找矿靶区优选[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(6): 514-523. <https://doi.org/10.12677/ag.2020.106049>
- [10] 孙岳, 潘家永, 肖振华, 刘颖, 潘春蓉, 钟福军, 赖静. 诸广山中段鹿井铀矿田构造解析与找矿远景探讨[J]. 中国地质, 2020, 47(2): 362-374.
- [11] 黄宝春, 肖振华. 诸广山中段羊角脑地区成矿构造特征及找矿方向[J]. 矿产与地质, 2019, 33(3): 83-91.
- [12] 张振华, 李顺初, 翦勋平. 鹿井铀矿田空间定位条件分析[J]. 铀矿地质, 1999, 15(6): 338-343.
- [13] 黄宏业, 等. 湖南鹿井地区铀成矿地质背景及找矿思路分析[J]. 世界核地质科学, 2008, 25(2): 63-67.
- [14] 张金带, 刘翔, 李友良, 等. 中南铀矿地质志[Z]. 北京: 中国核工业地质局, 2005.
- [15] 吴治南, 肖振华, 潘家永, 刘颖, 等. 湖南省诸广山岩体中部铀多金属矿整装勘查区专项填图与技术应用示范报告[R]. 郴州: 湖南省核工业地质局三〇二大队, 2016.
- [16] 孙凯南, 郭秋菊, 陈建平. 土壤物理性质对土壤氡浓度及地表氡析出率的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2005, 25(1): 78-80.
- [17] 李建威, 陈小东, 李紫金, 等. 鹿井铀矿床成矿流体演化的地球化学模拟[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(3): 266-273.
- [18] 刘国兴. 电法勘探原理与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [19] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [20] 李金铭. 电法勘探方法发展概况[J]. 物探与化探, 1996, 20(4): 250-258.
- [21] 汤井田, 何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- [22] 何继善, 等. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1990.
- [23] 罗延钟, 何展翔, 马瑞伍, 郭建华. 可控源音频大地电磁法的静态效应校正[J]. 物探与化探, 1991, 15(3): 196-202.
- [24] 刘天佑. 应用地球物理数据采集与处理[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2004: 154-167.
- [25] 肖振华, 肖健健, 罗晨, 等. 湖南省汝城县刘家坑-百担丘地区铀多金属矿普查报告[R]. 郴州: 湖南省核工业地质局三〇二大队, 2018.
- [26] 湖南省核工业地质局三〇二大队. 湖南省诸广山岩体中部铀矿整装勘查区矿产调查与找矿预测子项目成果报告[R]. 2019.
- [27] 肖振华, 肖健健, 罗晨, 等. 湖南省汝城县庙背垅地区铀矿普查报告[R]. 郴州: 湖南省核工业地质局三〇二大队, 2019.
- [28] 肖振华, 王自平, 罗晨, 等. 湖南省汝城县鱼跳-郭家地区铀矿普查报告[R]. 郴州: 湖南省核工业地质局三〇二大队, 2014.
- [29] 罗晨, 肖振华, 蔡勋龙, 等. 综合物化探方法组合在茶永盆地西南缘铀多金属矿深部找矿预测中的应用研究结果报告[R]. 郴州: 湖南省核工业地质局三〇二大队, 2020.